

Здесь представлены материалы статьи, опубликованной в "Журнале прикладной спектроскопии", 82(4), стр. 622-627 (2015 г.)

## ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИЗ МОДУЛЯЦИИ И ШУМОВ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ОДНОЧАСТОТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

А. О. Костромитин<sup>1</sup>, А. В. Кудряшов<sup>1,2\*</sup>, Л. Б. Лиокумович<sup>1</sup>

УДК 621.373.826;53.082.54

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ОАО "Светлана", Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kudrjashov\_av@sveitanajsc.ru

(Поступила 8 мая 2015)

*Рассматриваются одночастотные лазерные диоды в качестве источников волоконно-оптических интерферометрических измерителей физических величин с полностью оптическим пассивным чувствительным элементом. Показано, что ключевыми характеристиками лазерных источников в этом случае являются спектр шумов частоты и коэффициент модуляции частоты оптического излучения лазера. Приведены результаты измерений данных характеристик для нескольких образцов одночастотных лазерных диодов компаний Thorlabs и Qphotonics с описанием методик измерения. Полученные данные могут быть использованы при проектировании волоконно-оптических интерферометрических датчиков.*

**Ключевые слова:** одночастотный лазерный диод, волоконно-оптический интерферометр, шумы частоты лазера, модуляция частоты лазера.

**Введение.** Одночастотные полупроводниковые лазерные диоды представляют огромный интерес для применения в качестве источников света в волоконно-оптических интерферометрических устройствах измерения различных физических величин [1—4]. Эти источники имеют достаточно высокую когерентность излучения, хорошо согласуются с волоконно-оптическим трактом (в большинстве случаев они имеют волоконный вывод), характеризуются сравнительно низким энергопотреблением, малыми габаритами и массой, а также относительно невысокой стоимостью. Кроме того, характеристики лазерных источников такого типа чрезвычайно важны с точки зрения их применения в волоконно-оптических измерительных устройствах. При изучении разнообразных параметров одночастотных полупроводниковых лазеров редко уделяется внимание таким характеристикам, как спектры флуктуаций частоты излучения или коэффициент модуляции частоты излучения током инжекции. Однако именно эти характеристики являются ключевыми при использовании лазера в качестве источника света в интерферометрических устройствах.

Настоящая работа посвящена учету частотных шумов и коэффициента модуляции частоты лазерного источника при проектировании интерферометрических измерителей. Приведены результаты измерений этих характеристик для типичных современных одночастотных полупроводниковых лазеров.

**Анализ применения одночастотных полупроводниковых лазеров как источников для оптических интерферометрических измерителей.** В качестве примера рассмотрим схему волоконно-оптического интерферометрического измерителя (рис. 1), основанного на волоконном интерферометре Маха—Цендера. Фотоприемник регистрирует интерферометрический сигнал

$$u(t) = U_0 + U_m \cos \varphi(t), \quad (1)$$

где  $\varphi(t)$  — разность фаз интерферирующих волн, прошедших разные плечи интерферометра, причем обычно подразумевается, что она содержит квазистатистическую компоненту  $\varphi_0$  и колебания  $\varphi_c(t)$ , несущие информацию о внешнем воздействии на интерферометр:  $\varphi(t) = \varphi_0 + \varphi_c(t)$ . Конструкция чувствительного элемента должна обеспечивать эффективное преобразование измеряемого воздействия (например, акустического, вибрационного и др.) в сигнальную составляющую разности фаз  $\varphi_c(t)$  [3]. Квазистатистические параметры  $U_0$  и  $U_m$  определяются различными факторами, они задают контраст интерференционной картины и в идеале должны быть одинаковыми.

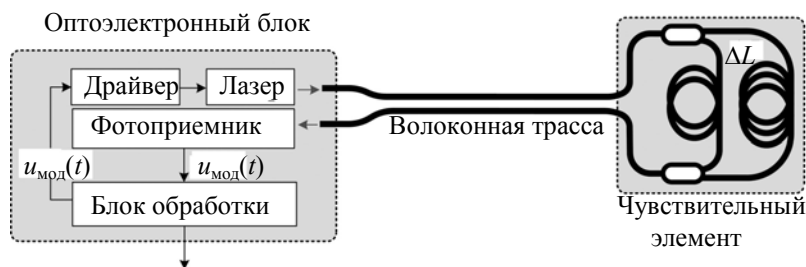


Рис. 1. Структурная схема волоконно-оптического интерферометрического датчика

Важной проблемой, которую необходимо решать при создании подобных измерителей, является демодуляция интерферометрического сигнала. Очевидно, что наблюдаемый сигнал  $u(t)$  не позволяет однозначно выделить информацию о наведенных воздействием колебаниях  $\varphi_c(t)$ , тем более в условиях присутствующего неконтролируемого дрейфа  $\varphi_0$  и возможности изменений  $U_0$  и  $U_m$ . Один из базовых способов, применяемых для решения данной проблемы, — введение вспомогательной модуляции разности фаз  $\psi(t)$  в диапазоне частот выше, чем диапазон частот колебаний  $\varphi_c$ . Это позволяет преодолеть неопределенность связи  $u(t)$  и  $\varphi(t)$  и за счет специальных методов обработки интерференционного сигнала выделить колебания  $\varphi_0 + \varphi_c(t)$ . Возможные методы такой обработки зависят от выбора формы сигнала вспомогательной модуляции  $\psi(t)$ .

Важный параметр интерферометра — разность длин плеч  $\Delta L$ , которая определяет чувствительность разности фаз  $\varphi(t)$  к колебаниям частоты лазерного источника  $\nu(t)$ . При определенных ограничениях на соотношение ширины спектра колебаний  $\nu(t)$  и значения  $\Delta L$ , обычно выполняемых на практике, связь колебаний частоты источника и разности фаз в интерферометре можно описать простым соотношением [3]

$$\varphi(t) = 2\pi\Delta L(n/c)\nu(t), \quad (2)$$

где  $n$  — эффективный показатель преломления в плечах (эффективный показатель преломления основной моды световода);  $c$  — скорость света в вакууме. Выражение (2) наглядно демонстрирует, что в случае идеально сбалансированного интерферометра (т. е. при  $\Delta L = 0$ ) интерферометрический сигнал не чувствителен к колебаниям частоты лазера. Однако для реальных схем с конечной разностью хода или преднамеренно разбалансированных интерферометров соотношение (2) определяет механизм как полезных, так и паразитных эффектов влияния  $\nu(t)$  на  $\varphi(t)$ .

Как отмечено выше, ключевой фактор осуществления демодуляции интерференционного сигнала — введение вспомогательной модуляции разности фаз  $\psi(t)$ . Для этого могут быть использованы различные варианты модуляторов, устанавливаемых в плече интерферометра. Однако для практических применений представляет интерес прежде всего схема с удаленным, электрически пассивным и нейтральным чувствительным элементом. Такая схема подразумевает, что чувствительный элемент с волоконным интерферометром удален от электронной аппаратуры посредством подводящего волоконно-оптического тракта и в чувствительном элементе отсутствуют модуляторы и другие устройства, требующие подачи электрических сигналов. При этом фактически единственным способом обеспечения требуемой вспомогательной модуляции является применение модуляции частоты излучения оптического источника при условии разбалансированного интерферометра. Для большинства типов одночастотных полупроводниковых лазеров модуляцию частоты можно реализовать за счет модуляции тока инжекции, что является существенным преимуществом таких источников при их использовании в волоконно-оптических интерферометрических измерителях. Такой вариант схемы представлен на рис. 1, где на драйвер лазерного источника от схемы обработки подается модулирующий сигнал  $u_{\text{мод}}(t)$ .

Для гармонического колебания тока инжекции в окрестности рабочей точки амплитуды тока  $I_m$  и частоты  $\nu_m$  связаны соотношением

$$v_m = K_v I_m. \quad (3)$$

Коэффициент  $K_v$  характеризует эффективность модуляции частоты излучения током инжекции для конкретного лазера и в общем случае зависит от частоты модулирующего сигнала. При организации вспомогательной модуляции в интерферометрическом измерителе необходимо знать зависимость  $K_v(f)$ . Отметим, что такой простой и привлекательный способ создания дополнительной фазовой модуляции сопровождается появлением модуляции мощности излучения лазера, поэтому значения  $I_m$  должны быть ограничены так, чтобы уровень паразитной модуляции мощности не превышал допустимого предела, обычно составляющего единицы процентов от рабочего тока лазера. В свою очередь, как следует из соотношения (2), амплитуда вспомогательной фазовой модуляции интерферометрического сигнала  $\psi_m$  пропорциональна амплитуде  $v_m$  с коэффициентом пропорциональности  $2\pi\Delta L n/c$ .

Оборотной стороной чувствительности  $\varphi$  к колебаниям частоты лазерного источника является то, что шумы частоты источника формируют шумовую компоненту  $\varphi_{ш}(t)$  (часто рассматривают спектральную плотность шума  $S_\varphi(f)$  [рад/Гц<sup>1/2</sup>]<sup>1</sup>). Этим обусловлено то, что при рассмотрении специализированных лазерных источников для интерферометрии обычно изучается не длина когерентности и ширина линии излучения, а шумы частоты лазера или спектральная плотность шумов частоты лазера  $S_v(f)$  [Гц/Гц<sup>1/2</sup>]. Для реальных интерферометрических измерителей фазовый шум  $\varphi_{ш}(t)$  (или  $S_\varphi(f)$ ), наведенный шумами частоты излучения лазера, может превалировать над остальными источниками шумов, особенно при использовании преднамеренно разбалансированного интерферометра (для обеспечения вспомогательной модуляции  $\psi(t)$ ).

Приведенные соотношения можно также проиллюстрировать возможной последовательностью оценок величин, определяющих функционирование интерферометрического измерителя. Например, можно исходно задать требуемую для системы обработки интерференционного сигнала амплитудой вспомогательной модуляции  $\psi_m$  и допустимое значение  $I_m$ , обусловленное ограничением на величину паразитной глубины модуляции интенсивности света. При известном значении  $K_v$  с учетом (2) выбрать необходимое значение  $\Delta L = \psi_m c / (2\pi n K_v I_m)$ . При известной эффективной величине шума частоты лазера в рабочей полосе частот измерителя  $\delta v_{ш}$  эффективный уровень соответствующего фазового шума, зарегистрированного измерителем сигнала, оценить как  $\delta\varphi_{ш} = (2\pi\Delta L n/c)\delta v_{ш}$  (при рассмотрении спектров шума  $S_\varphi(f) = (2\pi\Delta L n/c)S_v(f)$ ). Таким образом, выбор достаточно большого значения  $\Delta L$  для обеспечения модуляции  $\psi_m$  приводит к росту уровня выходного фазового шума  $\delta\varphi_{ш}$ . Поэтому требования к характеристикам источника  $S_v(f)$  и  $K_v(f)$  сложным образом взаимосвязаны с  $\Delta L$  и допустимым уровнем шума  $\delta\varphi_{ш}$ , обусловленным требованиями к разрешающей способности измерителя.

Важным аспектом оценки влияния параметров лазерного источника на волоконно-оптический интерферометрический измеритель и выбор источника является то, что требуемые характеристики лазеров, прежде всего  $S_v(f)$  и  $K_v(f)$ , обычно не приводятся и не измеряются производителями. Модуляционная характеристика частоты током инжекции не указывается, а когерентные свойства полупроводниковых лазеров характеризуют шириной спектральной линии, что не позволяет корректно оценить  $S_v(f)$  и, как следствие, определить выходные шумы измерителя. В последние годы производители специализированных высокостабильных лазерных источников для интерферометрии стали приводить данные по  $S_v(f)$ , однако это не относится к одночастотным полупроводниковым лазерным диодам. В итоге задача исследования указанных шумовых и модуляционных характеристик частоты полупроводниковых лазерных диодов остается актуальной. Поэтому далее для одночастотных полупроводниковых лазерных источников приведены результаты измерения  $S_v(f)$  и  $K_v(f)$ . Отметим, что для измерителей акустических, вибрационных и других сигналов типичные диапазоны рабочих частот составляют от десятков герц до десятков килогерц, частоты вспомогательной модуляции обычно — от десятков до нескольких сотен килогерц.

**Методика измерений характеристик колебаний частоты лазерных источников и выбор образцов лазеров для измерителей.** Чувствительность интерференционного сигнала к флуктуациям частоты источника может проявляться и как паразитный механизм формирования шумов сигнала  $\varphi(t)$ , и как полезный механизм осуществления вспомогательной модуляции. Поэтому интерферометр является эффективным и чувствительным элементом для регистрации шумовых или регулярных флуктуаций частоты лазера

<sup>1</sup> В статистической радиофизике, радиотехнике, теории сигналов и т. п. для спектров “шумовых” сигналов используются спектральные плотности. Классический вариант — введение спектральной плотности средней мощности шума (или спектральной плотности мощности), которая выражается в единицах [квадрат величины/Гц]. Однако для прямого сопоставления часто удобно использовать корень из этой величины. В этом случае часто пишут “спектральная плотность шума, фазы или частоты”, размерность [единица величины/Гц<sup>1/2</sup>].

и применяется в таких измерениях [5]. Экспериментальный стенд сформирован на основе волоконно-оптического интерферометра Маха—Цендера, его схема показана на рис. 2. Интерферометр помещен в специальную камеру для звукоизоляции и снижения влияния вибраций и температурных флуктуаций на дрейф разности фаз  $\varphi$ . Для управления током всех лазерных диодов использован драйвер ИТС 5022 (Thorlabs), который имеет сравнительно низкий уровень шумов тока накачки ( $< 2$  мкА).

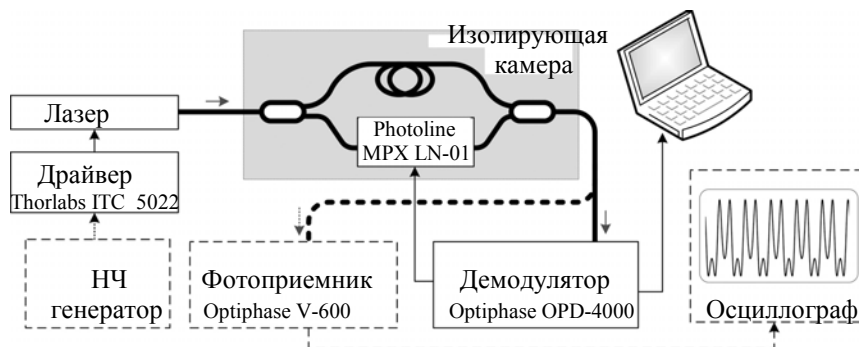


Рис. 2. Структурная схема измерительного стенда (пунктиром показаны приборы и сигналы, подключаемые при измерении  $K_v(f)$ )

При исследовании шумов частоты лазерного источника в стенде применяется специальный демодулятор интерференционного сигнала OPD-4000 (Optiphase), который предназначен для обработки интерференционного сигнала и выделения  $\varphi(t)$ . В данном случае прибор использовался для регистрации флуктуаций фазы  $\varphi_m(t)$ , наведенных шумами частоты лазерного источника  $\nu_m(t)$ . Демодулятор формирует гармонический сигнал  $U_{\text{ВМ}}$  вспомогательной модуляции (с частотой 50 кГц) и осуществляет прием и обработку интерферометрического сигнала, в результате чего детектируются колебания  $\varphi(t)$  в диапазоне 1—25 кГц. Для создания вспомогательной фазовой модуляции интерферометрического сигнала в плече волоконно-оптического интерферометра установлен электрооптический модулятор фазы света MPX LN-01 (Photline).

Путем обработки данных демодулятора определены спектры шумовых колебаний  $S_\varphi(f)$  в диапазоне до 25 кГц (этот диапазон задается максимальным рабочим диапазоном частот демодулятора), которые затем пересчитаны в спектр  $S_\nu(f)$  на основе пропорциональной связи между  $\nu(t)$  и  $\varphi(t)$ , задаваемой (2). В ходе измерений использованы несколько вариантов разности длин плеч  $\Delta L$  в интервале 1—20 м, в этом диапазоне для частот 1 и 10 кГц подтверждена высокая линейность зависимости  $S_\varphi(f)$  от  $\Delta L$ . Основная часть измерений выполнена для  $\Delta L = 5$  м.

При исследовании модуляционной характеристики  $K_v(f)$  электрооптический модулятор MPX LN-01 и демодулятор OPD-400 не использованы, поскольку диапазон рабочих частот демодулятора (максимум 25 кГц при малом уровне сигнала  $\varphi(t)$ ) не позволяет исследовать  $K_v(f)$  в области сотен килогерц. При измерениях  $K_v(f)$  модулирующий гармонический сигнал  $u_m(t)$  с частотой  $f$  подается от низкочастотного генератора на соответствующий вход драйвера лазерного диода, а возникающий интерферометрический сигнал вида (1), где  $\varphi(t) = \varphi_0 + \varphi_m(t)$ , регистрируется многофункциональным лабораторным фотоприемником V-600 (Optiphase) и наблюдается на осциллографе (рис. 2). Для определения коэффициента  $K_v(f)$  фиксируется амплитуда модуляции тока, при которой достигается индекс фазовой модуляции интерференционного сигнала  $\psi_m = \pi$ . При таком индексе модуляции интерференционный сигнал имеет характерную форму (условно изображенную на рис. 2), позволяющую зафиксировать данное значение  $\psi_m$  с достаточно хорошей точностью. Коэффициент модуляции частоты лазера определяем в соответствии с выражением

$$K_v(f) = c / (2\Delta L n K_i u_m(f)), \quad (5)$$

где  $K_i = I_m / u_m$  — коэффициент преобразования напряжение—ток драйвера управляющего лазером (мА/В);  $u_m$  — амплитуда сигнала генератора, при которой достигается  $\psi_m = \pi$ . Выражение (5) нетрудно получить из (2) с учетом того, что амплитуда колебаний тока лазерного диода  $I_m = K_i u_m$ .

Измерения величины  $K_v$  выполнены в области 1—250 кГц, что определяется диапазоном рабочих частот модуляции тока в драйвере ИТС 5022 и соответствует характерному диапазону частот модуляции в большинстве практических применений. В качестве характерных вариантов компактных одночастотных полупроводниковых лазерных источников для исследований выбраны доступные на рынке одночастотные лазеры QDFBLD-1550-50 (Qphotonics) и SFL1550P (Thorlabs). Лазеры QDFBLD-1550-50 указаны производителем как полупроводниковые лазерные диоды с распределенной обратной связью (DFB). Источники

модели SFL1550P заявлены как полупроводниковые лазеры с внешним резонатором (external cavity) и позиционируются как альтернатива источникам типа DBF. Оба варианта лазеров имеют длину волны излучения  $\lambda = 1550$  нм и рабочую мощность излучения 20—50 мВт. В технических паспортах этих моделей лазеров указаны характеристики, связанные с управлением лазером, током накачки и оптической мощностью, а также ширина линии излучения, но не приводится информация о спектре частотных флуктуаций и модуляционной характеристике. Для модели SFL1550P была возможность провести измерения характеристик трех образцов лазерных диодов, для QDFBLD-1550-50 — двух образцов.

**Результаты и их обсуждение.** Спектры частотных шумов излучения для всех пяти образцов лазерных источников приведены на рис. 3, а. Как видно, для большинства образцов в диапазоне от нескольких до 25 кГц спектральная плотность шума  $S_v(f)$  почти не изменяется, но в области единиц кГц и ниже наблюдается подъем уровня шума. Результаты измерений модуляционных характеристик  $K_v(f)$  приведены на рис. 3, б. Для всех полученных зависимостей коэффициент модуляции снижается при росте частоты модуляции с наклоном от 2.5 до 3.5 дБ/декаду. Спад характеристики  $K_v(f)$  обусловлен тем, что сдвиг частоты излучения связан с инерционным тепловым механизмом [4].

В целом можно отметить довольно существенный разброс полученных зависимостей  $S_v(f)$  и  $K_v(f)$  для разных образцов одной модели лазерного источника. Результаты измерений отражают характерный уровень данных параметров для рассматриваемых моделей лазерных источников и позволяют примерно оценить  $S_v(f)$  и  $K_v(f)$  для одночастотных полупроводниковых лазерных диодов подобного класса. В табл. 1 приведены обобщенные параметры лазеров Thorlabs SFL1550P и Qphotonics QDFBLD-1550-50, полученные по характеристикам, представленным на рис. 3. Измерения показывают, что уровень частотных шумов излучения полупроводникового лазерного диода может существенно изменяться в зависимости от драйвера. Отметим кратко результат измерения  $S_v(f)$  при использовании драйвера CLD1015 (Thorlabs), для которого в паспорте указан уровень шума тока на порядок выше, чем у прецизионного драйвера модели ИТС 5022.

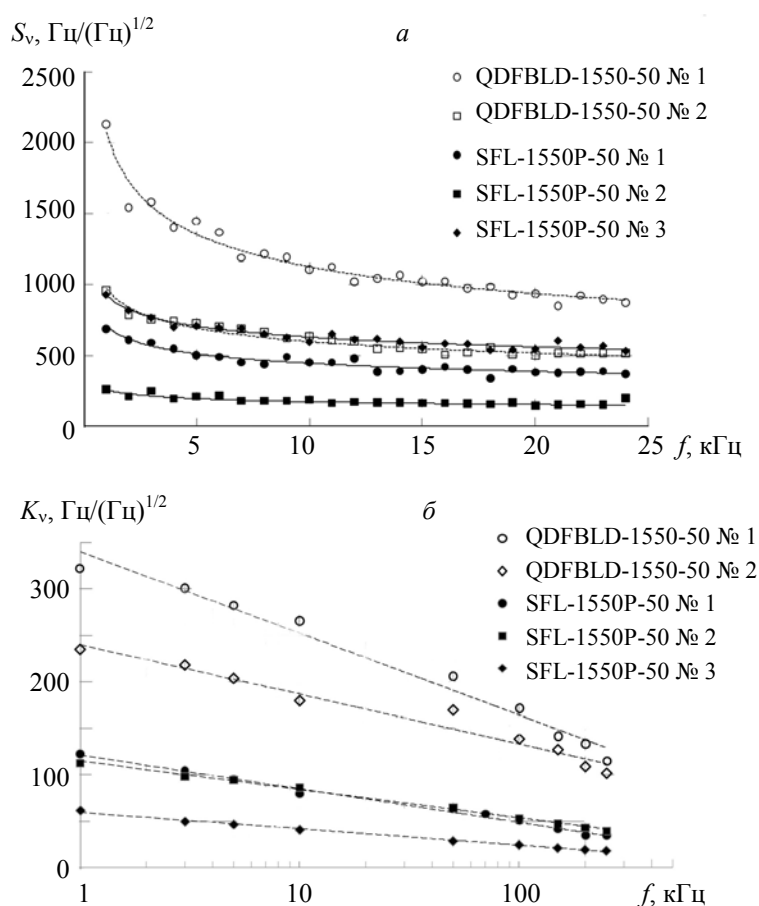


Рис. 3. Зависимости частотных шумов (а) и коэффициента частотной модуляции (б) излучения лазерных источников от частоты модуляции

**Т а б л и ц а 1. Параметры полупроводниковых лазерных источников**

Модель лазера	$S_v(f)$ , Гц/Гц <sup>1/2</sup> для частот 10—20 кГц	$K_v(f)$	
		МГц/мА при $f = 1$ кГц	дБ/декаду
Thorlabs, SFL1550P	200—600	50—150	~3.5
Qphotonics, QDFBLD-1550-50	500—1000	200—350	2.5—3

При использовании драйвера CLD1015 вместо ИТС 5022 уровень спектральной плотности частотного шума  $S_v(f)$  возрастает до 3—4 раз, в спектре шума появляются области подъема и новые дискретные компоненты, причем четкой корреляции степени подъема частотных шумов лазера с его модуляционной характеристикой не наблюдается.

**Заключение.** С использованием описанных методик выполнены измерения шумов частоты и коэффициента модуляции частоты током инжекции для типичных современных одночастотных полупроводниковых лазерных диодов. На основании результатов измерений можно делать приближенные оценки, необходимые для построения волоконно-оптических интерферометрических измерителей с данными лазерными источниками или источниками аналогичного типа. Для получения точных выводов необходимо проводить измерения характеристик непосредственно того образца лазерного источника, который предполагается использовать.

[1] Э. Удд. Волоконно-оптические датчики: Вводный курс для инженеров и научных работников, пер. с англ., Москва, Техносфера (2008)

[2] **Zujie Fang, Ken K. Chin, Ronghui Qu, Haiwen Cai.** Fundamentals of Optical Fiber Sensors, John Wiley & Sons, Inc. (2012)

[3] **Л. Б. Ликумович.** Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Ч. 2. Волоконный интерферометрический чувствительный элемент, Санкт-Петербург, изд-во Политех. ун-та (2007)

[4] **Окоси. Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ.** Волоконно-оптические датчики, Ленинград, Энергоатомиздат (1990)

[5] **R. Slavik, Y. Liao, E. Austin, P. Petropoulos, D. J. Richardson.** Proc. SPIE, **8789** (2011) 87890R